

ONGERUBRICEERD

TNO-rapport  
TPD-HOI-RPT-960060

## Ontwikkeling van de F-PVIS ten behoeve van metingen aan de Mega Ampère Pulser

TNO Technisch Fysische Dienst  
TU Delft

Stieltjesweg 1  
Postbus 155  
2600 AD Delft

Telefoon 015 269 20 00  
Fax 015 269 21 11

OPGESTELD DOOR: ir. L.K. Cheng  
GECONTROLEERD DOOR: ir. C. Smorenburg  
GOEDGEKEURD DOOR: ir. P. van Zuylen



DATUM

19 augustus 1996

Rubricering

Vastgesteld door : ir. J.L.M.J. van Bree

Vastgesteld d.d. : 16 augustus 1996

(na 10 jaar vervalt deze rubricering)

Titel : Ongerubriceerd

Managementuittreksel : Ongerubriceerd

Samenvatting : Ongerubriceerd

Rapporttekst : Ongerubriceerd

Bijlagen A-B : Ongerubriceerd

Exemplaar nr. : 17

Oplage : 18

Aantal pagina's : 38  
(inclusief bijlagen, exclusief distributielijst)

Aantal bijlagen : 2

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt  
door middel van druk, fotokopie, microfilm  
of op welke andere wijze dan ook, zonder  
voorafgaande toestemming van TNO.

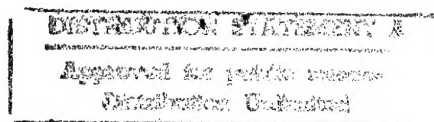
Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
Algemene Voorwaarden voor onderzoeks-  
opdrachten aan TNO, dan wel de  
betreffende terzake tussen partijen  
gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het TNO-rapport  
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

DTIC QUALITY INSPECTED 3

ONGERUBRICEERD

TPD vervult vanuit een multi-disciplinaire aanpak  
opdrachten voor bedrijfsleven en overheid.  
Kennisegebieden zijn: toegepaste fysica, informatica,  
mechanica, elektronica, materialen en  
processtechnologie.



Nederlandse organisatie voor toegepast-  
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO.

19970212 052

titel : Werkbelasting in de Technische Centrale van het M-fregat  
auteur : Dr. L.C. Boer  
datum : 19 augustus 1996  
opdrachtnr. : A95/KM/366  
IWP-nr. : 787.1  
rapportnr. : TM-96-A034

In dit rapport wordt verslag gedaan van de technische centrale van een M-fregat tijdens gesimuleerde oorlogsomstandigheden, en wel over de werkbelasting. De metingen van werkbelasting maakten deel uit van een uitgebreid onderzoek naar de ergonomie van de technische centrale. Ook werd, in een ander deel van het project en buiten de oefeningen om, de mening van de bemanning over de technische centrale gepeild.

Voor de werkbelastingsmetingen werden werkbelastingshorloges ("workload watches") aan de bemanning uitgereikt. Met deze op de pols gedragen apparaten werd gemeten *tijdens het werk*. De werkbelastingshorloges bleken aan de verwachtingen te voldoen; de bemanning kon de werkbelasting inderdaad rapporteren tijdens het werk, zonder dat dit het werk hinderde. Aldus werden werkbelastingsprofielen verzameld die vervolgens op pieken geanalyseerd werden. Dergelijke pieken—perioden waarin de werkbelasting te hoog was—werden aangetroffen bij de twee managers (20% en 7% van de tijd) en bij een van de drie operators, de energie-operator (11% van de tijd).

In het zoeken naar mogelijke oorzaken werd verdisconteerd dat bepaalde onderdelen van de technische centrale nog vrij nieuw waren—o.a. het plotten van schade vanaf de sectieposten—waardoor met name de managers het systeem mogelijk niet ten volle benut hebben. Aanbevolen wordt de werkbelasting opnieuw te meten over ongeveer een jaar. De oorzaak van de overbelaste energie-operator werd herleid tot het vele onthoud- en zoekwerk dat nodig is om ruimten "spanningsloos" te maken. De aanbeveling is: ondersteun deze operator beter bij de uit te voeren taak. Dit zou de ergonomie van de technische centrale ten goede komen en bovendien een nogal *ad hoc* toegevoegde hulpkracht uitsparen. Het rapport laat zien dat werkbelastingsmetingen nuttig zijn bij ergonomische evaluaties.

## Managementuittreksel

Titel : Ontwikkeling van de F-PVIS ten behoeve van metingen aan de Mega Ampère Pulse

Auteur(s) : L.K. Cheng

Datum : 19 augustus 1996

Opdrachtnr. : A93/D/123

IWP-nr. : -

Rapportnr. : TPD-HOI-RPT-960060

### Aanleiding tot het onderzoek

Een belangrijk werkgebied van het PML is het onderzoeken van explosie- en impactsverschijnselen. Hiertoe heeft het PML o.a. de Mega Ampère Pulser (MAP) ontwikkeld voor het versnellen van dunne "flyers" die vervolgens inslaan op diverse "target" materialen. Essentieel voor het karakteriseren van de MAP zijn de snelheden van de flyers. Door de gebruikte hoge stromen in de MAP, ontstaan er sterke EM velden waardoor een optische methode voor het meten van de snelheid van de flyer de enige methode blijkt te zijn. Uit een eerder onderzoek is gebleken dat de Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS) het meest geschikte meetsysteem is.

### Doel van het onderzoek

Het ontwikkelen en realiseren van de Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS) ten behoeve van snelheidsmetingen aan de flyer in de MAP.

### Werkplan

Het optimaliseren van het ontwerp van de F-PVIS voor toepassingen in de MAP. Het realiseren en beproeven van de F-PVIS. Een essentiële component in de F-PVIS is een speciale coating van de Fabry-Perot interferometer. In dit onderzoek wordt een geschikt productieproces voor deze coating ontwikkeld. Verder wordt er geëxperimenteerd met de toepassing van de F-PVIS voor een aantal afgeleide metingen. Een voorbeeld is het analyseren van de schokgolf in het target materiaal.

### Conclusies

De F-PVIS is met succes ontwikkeld en beproefd. De prestaties van de F-PVIS voor snelheidsmetingen aan de flyer in de MAP overtreffen de gestelde eisen. Verder schijnt de F-PVIS toegepast te kunnen worden bij een aantal afgeleide metingen zoals het analyseren van de schokgolf in het target materiaal. De eerste resultaten van deze afgeleide metingen zijn zeer bemoedigend. In de toekomst zal de F-PVIS nog geoptimaliseerd worden tot een robuust en gebruiksvriendelijk systeem.

## Samenvatting

In dit rapport worden de werkzaamheden in het kader van onderzoek aan de glasvezel Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS) behandeld. De gerapporteerde werkzaamheden zijn tussen 1993 en 1995 door TPD uitgevoerd en omvatten de bouw en optimalisatie van de F-PVIS. De door TPD ontworpen F-PVIS wordt in eerste instantie toegepast voor het meten van de flyersnelheid in de Mega Ampère Pulser (MAP). Een belangrijk deel van de werkzaamheden was het realiseren van het essentiële transparante venster van 150  $\mu\text{m}$  breed in een reflectiecoating van de Fabry-Perot interferometer. Uit meetresultaten van PML blijkt dat de tijdsresolutie van de F-PVIS ca. 10 ns is. De snelheidsresolutie is beter dan 100 m/s en het meetbereik kan meer dan 20 km/s bedragen.

Naast het meten van de flyersnelheid wordt de F-PVIS ook toegepast voor het bepalen van de oppervlaksnelheid van het grensvlak tussen een testmateriaal en een PMMA plaat. Uit het meetresultaat kan het profiel van de schokgolf berekend worden. Een ander type meting onder ontwikkeling is het meten van enkele parameters van de schokgolf middenin een testmateriaal. Hierbij wordt een glasvezel sensor (in combinatie met de F-PVIS) gebruikt. Door meerdere glasvezel sensoren op verschillende locaties in een testmateriaal te plaatsen is in de toekomst mogelijk de schokgolf snelheid te bepalen.

## Abstract

This report describes the TPD activities on the Mega Ampère Pulser (MAP) between 1993 and 1995. In this period, a fiber optic Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS) for measuring the flyer velocity in the MAP is built and tested. Herewith investigations and experiments are carried out on the individual components of the F-PVIS. The main part of the investigation involves the fabrication of a transparent slit with a width of 150  $\mu\text{m}$  in the high-reflection coating of the Fabry-Perot interferometer. From the test results, the measurement range of the F-PVIS is found to be more than 20 km/s and the resolution is better than 100 m/s. Besides of the flyer velocity, PML has also used the F-PVIS for shockwave analysis by measuring the velocity of the boundary between a test material and a PMMA plate. Another application under investigation is the use of a fiber optic sensor probe (in combination with the F-PVIS) for shockwave analysis inside a test material. In the future, the shockwave velocity inside a test material could also be deduced by applying multiple sensor probes.

## Inhoud

1	Inleiding .....	7
2	Theorie van de F-PVIS .....	8
3	Ontwerp van de F-PVIS .....	10
4	Onderzoek aan de F-PVIS .....	14
4.1	Transparant venster in de Fabry-Perot interferometer .....	14
4.2	De glasvezel .....	22
4.3	De akoesto-optische modulator .....	22
4.4	Verbreden van de laserbundel met een beamexpander .....	23
4.5	Efficiëntie van het bundel-transport systeem .....	23
4.6	Coating op flyer .....	24
5	Metingen met de F-PVIS .....	26
5.1	Snelheid van de flyer .....	26
5.2	Bepalen van de schokgolf door middel van oppervlaksnelheid .....	27
5.3	Andere toepassingsmogelijkheden van de F-PVIS in de MAP .....	29
6	Bepalen van het profiel van de schokgolf in het testmateriaal .....	30
7	Conclusies en aanbevelingen .....	34
Referenties		
Appendix A    Uitlijnprocedure van de F-PVIS		
Appendix B    Reflectie van coating met een compenserend lagenpakket		

## Lijst van symbolen

$c$	snelheid van licht in vacuüm	m/s
$d$	afstand tussen de spiegels van de Fabry-Perot interferometer	m
$D_j$	diameter van de j-de orde ring	m
$f$	brandpunts afstand	m
$F$	finesse	--
$I_i$	intensiteit van de invallende vlakke golf	W/m <sup>2</sup>
$I_t$	intensiteit van de doorgaande vlakke golf	W/m <sup>2</sup>
$i$	aantal nieuwe ordes in het interferentie patroon	--
$n$	brekingsindex van de glasvezel	--
$N_{eff}$	effectieve brekingsindex van de glasvezel	--
$p$	periode van de in-fiber Bragg tralie	m
$R$	reflectiecoëfficiënt	--
$T$	transmissiecoëfficiënt	--
$v$	snelheid van het test object	m/s
$\delta$	faseverschil	rad
$\epsilon$	rek in de glasvezel	--
$\lambda$	golflengte	m
$\Delta\lambda$	verschuiving in de golflengte	m
$\lambda_B$	golflengte dat door een in-fiber Bragg tralie gereflecteerd wordt	m
$\theta$	invalshoek op de Fabry-Perot interferometer	rad

## 1 Inleiding

In dit rapport worden de werkzaamheden in het kader van onderzoek aan de glasvezel Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS) t.b.v metingen aan de Mega Ampère Pulser (MAP) behandeld. Deze werkzaamheden zijn tussen 1993 en 1995 door TPD uitgevoerd.

Bij PML is een Mega Ampère Pulser (MAP) gebouwd om een schokgolf (drukpuls) in testmaterialen te genereren. Hierbij wordt een stuk kunststof folie (de flyer) met zeer hoge snelheid tegen het testmateriaal (de target) geschoten. Bij inslag van de flyer op het testmateriaal ontstaat er een schokgolf in het testmateriaal.

Om dit proces nauwkeurig te kunnen bestuderen, moeten een aantal parameters gemeten worden:

- Snelheid van de flyer.
- Profiel van de schokgolf (indien mogelijk binnen in het testmateriaal). Deze kan o.a. afgeleid worden van de snelheid van het grensvlak testmateriaal - buffermedium.

TPD heeft in 1992 de glasvezel F-PVIS ontworpen welke geschikt is voor het meten van snelheden tot 20 km/s [1]. De theorie en het ontwerp van de F-PVIS worden kort behandeld in Hst. 2 en 3. Verder worden de verschillende metingen, experimenten en onderzoeken die noodzakelijk zijn om dit systeem te optimaliseren in Hst. 4 beschreven. De verschillende parameters die gemeten (kunnen) worden met de F-PVIS vinden we terug in Hst. 5. De resultaten van een aantal experimenten worden eveneens hierin getoond. Hoewel we het profiel van de schokgolf (drukpuls) aan het uiteinde van een testmateriaal kunnen bepalen uit de snelheid van het grensvlak testmateriaal - buffermedium, bestaat toch de wens het profiel van de schokgolf "in" het testmateriaal te meten. Het onderzoek naar het meten van deze hoge druppuls in een testmateriaal wordt beschreven in Hst. 6. In Hst 7 zijn de conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek opgenomen.

## 2 Theorie van de F-PVIS

De Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS) is gebaseerd op het meten van de Doppler verschuiving  $\Delta\lambda$  van een golflengte  $\lambda$  van het licht dat gereflecteerd wordt door een bewegend object. In het geval van de MAP is het bewegende object de flyer of de oppervlak van de target. Indien de snelheid  $v$  van het voorwerp klein is t.o.v. de lichtsnelheid  $c$ , geldt er:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2v}{c} . \quad (1)$$

Voor de groene lijn van de argon laser (golflengte = 515 nm) en een snelheid  $v$  van b.v. 20 km/s bedraagt de Doppler verschuiving 0.069 nm. De F-PVIS zet deze verschuiving om in een positieverandering van een aantal focuserende spot's. De positieverandering wordt met behulp van een streak camera op een film geregistreerd en hieruit kan de Doppler verschuiving en dus de snelheid van het object berekend worden.

### Fabry-Perot interferometer

De essentiële component in de F-PVIS is de Fabry-Perot interferometer. De transmissie van een verliesvrije Fabry-Perot interferometer met twee identieke spiegels wordt weergegeven met de volgende formule:

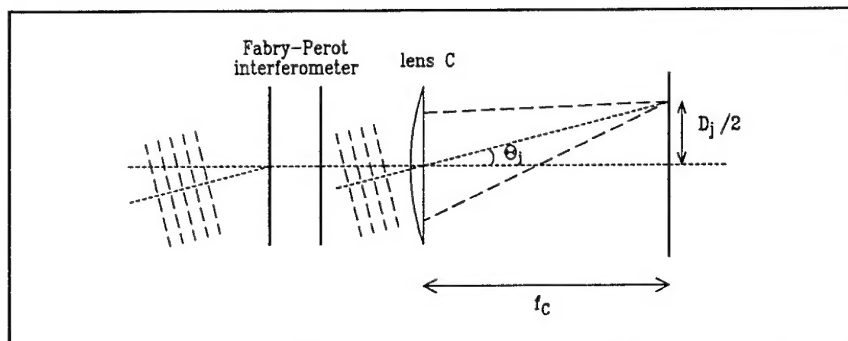
$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{T^2}{T^2 + 4 R \sin^2(\delta/2)} . \quad (2)$$

Hierin is  $R$  resp.  $T (=1-R)$  de reflectie- resp. transmissiecoëfficiënt van de spiegel,  $I_i$  is de intensiteit van de invallende vlakke golf welke een voortplantingsrichting heeft die een hoek  $\Theta$  maakt met de optische as van de Fabry-Perot interferometer. Verder is:

$$\delta = \frac{4\pi d \cos\theta}{\lambda} , \quad (3)$$

met  $d$  gelijk aan de afstand tussen de spiegels van de interferometer.

Bij constante  $d$  en  $\lambda$  kunnen we de Fabry-Perot interferometer dus als een hoek afhankelijk filter beschouwen.



**Figuur 1** Lens C focust een vlakke golf uit de Fabry-Perot interferometer in een punt op het brandvlak van lens C.

De doorgelaten golf kan met behulp van een lens C gefocust worden in het brandvlak van de lens (Fig. 1). Aangezien dit systeem rotatiesymmetrisch is, bestaat de transmissie-karakteristiek van dit Fabry-Perot interferometer systeem uit concentrische ringen (Fig. 2) met  $D_j$  de diameter van de  $j$ -de orde ring.  $D_j$  is een functie van de afstand  $d$  tussen de spiegels en de golflengte  $\lambda$ . Door de verandering in  $D_j$  bij constante  $d$  te volgen, kunnen we de verandering in de golflengte en dus ook de snelheid van het bewegende object bepalen. De theorie van de in Fig. 1 geschetste opstelling is reeds uitvoerig beschreven [1]. Hieruit volgt de volgende relatie tussen de snelheid van het object en de diameter van de verschillende ringen:

$$v = \frac{c\lambda}{4d} \left( i + \frac{D_j^2(v) - D_j^2}{D_{j+1}^2 - D_j^2} \right) . \quad (4)$$

Hierin is  $D_j(v)$  de diameter van de  $j$ -de orde ring bij een snelheid  $v$  en  $i$  is het aantal nieuw ontstane ringen.

#### De finesse $F$

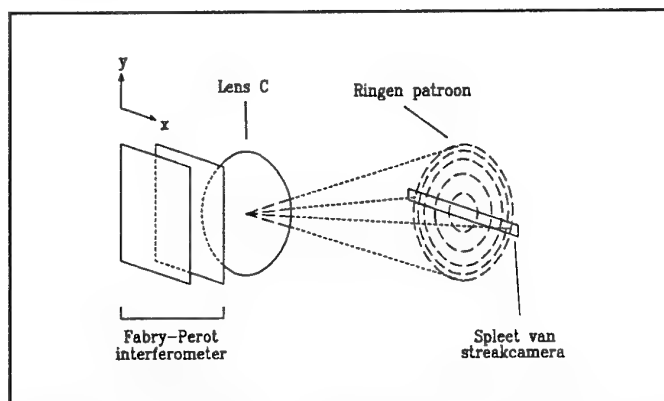
Voor de meting is het van belang dat we de positie van de ringen nauwkeurig kunnen bepalen. Voor de Fabry-Perot interferometer bestaat een grootheid  $F$ , de finesse:

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R} . \quad (5)$$

In benadering is  $F$  gelijk aan de verhouding van de afstand tussen twee opeenvolgende ordes en de halfwaardebreedte van de beschouwde ordes. Naarmate de finesse hoger is, is het ringen patroon scherper en de posities van de ringen kunnen dan nauwkeuriger bepaald worden.

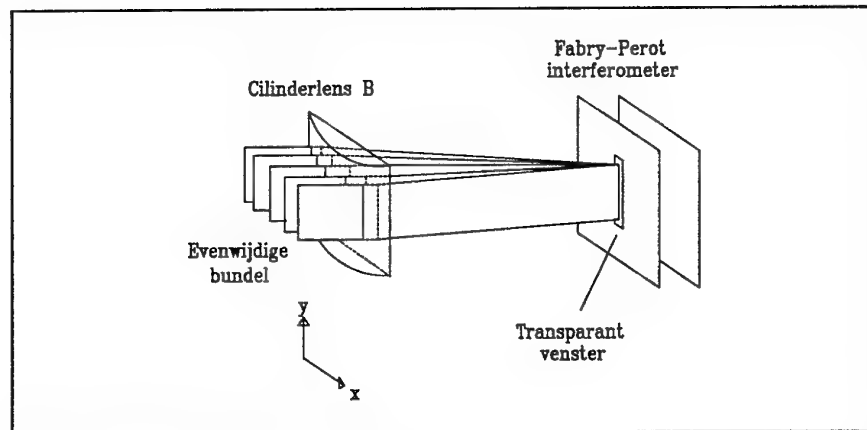
### 3 Ontwerp van de F-PVIS

Voor het bepalen van de diameterverandering dient het ringen patroon in het brandvlak van lens C geregistreerd worden. Dit gebeurt met behulp van een fotografische streak camera met een smalle spleet van tot een paar honderd  $\mu\text{m}$ 's breed (zie Fig. 2).



**Figuur 2** Ringen patroon achter lens C van een Fabry-Perot interferometer.

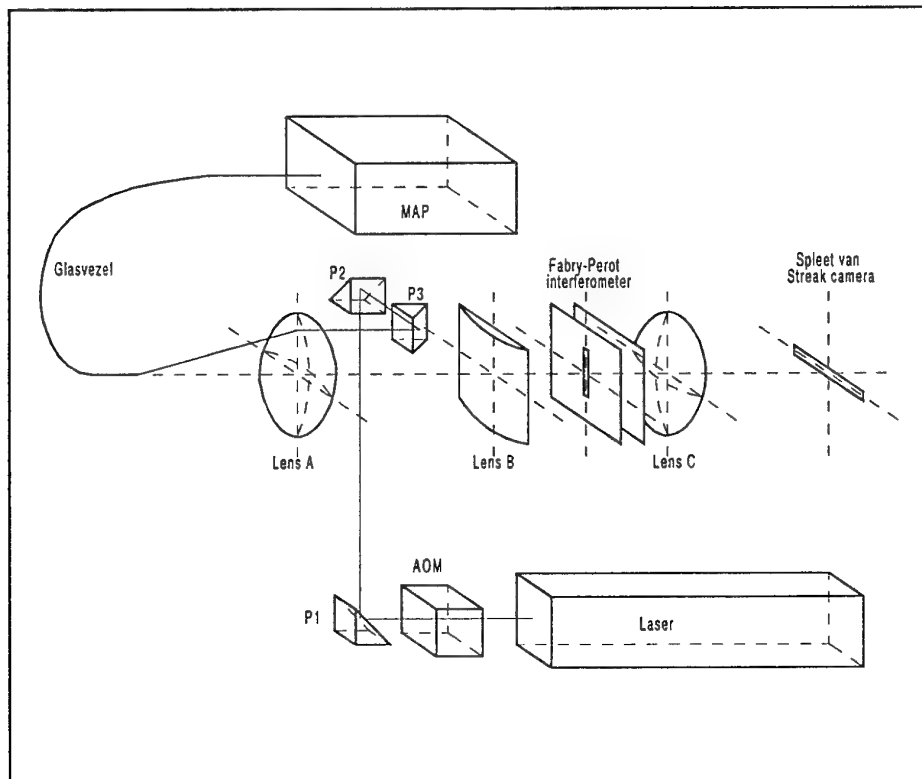
Nadeel van dit simpele ontwerp is dat het grootste gedeelte van het licht van de ring buiten de spleet valt, en hierbij verloren gaat. Aangezien de snelheid waarmee de film t.o.v. de spleet van de streakcamera beweegt, zeer hoog is (tientallen tot honderden  $\mu\text{m}/\text{ns}$ ), wordt de film maar zeer kort belicht (enkele tot tientallen ns). In de uiteindelijke TPD F-PVIS is het systeem zo ontworpen dat het licht dat aan de Fabry-Perot interferometer aangeboden wordt alleen een divergentie heeft in de horizontale richting (= richting van de spleet). Dit wordt gerealiseerd door een evenwijdige bundel m.b.v. een cilinderlens B in de horizontale richting te focuseren (Fig. 3). Alle licht dat uit de Fabry-Perot (F-P) interferometer komt, wordt nu met lens C geconcentreerd op de spleet van de streakcamera.



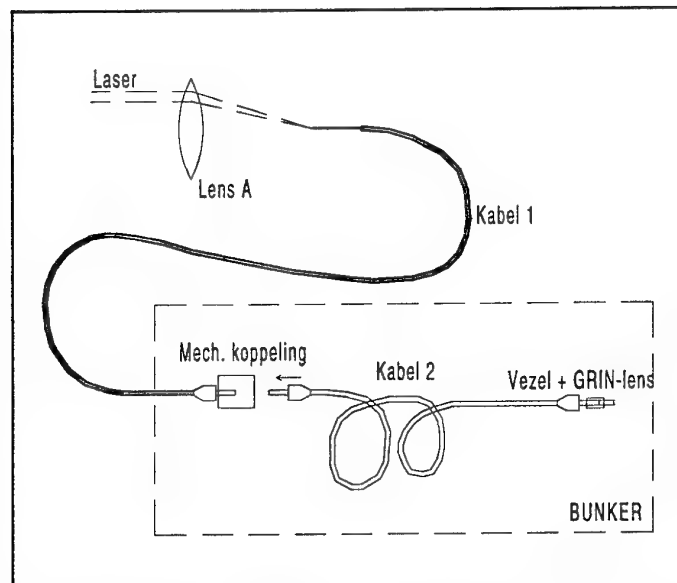
**Figuur 3** M.b.v. een cilinderlens B wordt een evenwijdige bundel in de horizontale richting op het transparant venster van de Fabry-Perot interferometer gefocusseerd.

Om de hoeveelheid licht dat in de Fabry-Perot interferometer gekoppeld wordt te maximaliseren is de eerste spiegelcoating van de Fabry-Perot interferometer in het brandvlak geplaatst. In combinatie met een transparant venster in de spiegelcoating (Fig. 3) kan nagenoeg alle licht in de Fabry-Perot interferometer worden gekoppeld.

Het totale systeem (Fig. 4) is ontworpen in 1993. Licht uit een "single frequency" Argon laser passeert eerst een akoesto-optische modulator (AOM) welke fungeert als een sluiters voor het systeem. Wanneer de sluiters open is, wordt de evenwijdige bundel met behulp van het bundel-transport systeem bestaande uit 3 prisma's (P1, P2 en P3), in het F-PVIS systeem gebracht. Lens A focust de bundel in een 100/140 vezel (kerndiameter = 100  $\mu\text{m}$  en dikte van deklaag = 20  $\mu\text{m}$ ). Het licht wordt m.b.v. een mechanisch koppelstuk (connector of splice) doorgekoppeld naar een vezel waarvan het andere uiteinde voorzien is van een GRaded INdex (GRIN) lens (Fig. 5). Licht dat gereflecteerd wordt aan het bewegende object gaat in de omgekeerde richting terug naar de F-PVIS en wordt gecollimeerd door lens A. De cilinder lens B zorgt voor focussing in de horizontale richting op het transparante venster van de Fabry-Perot interferometer. Het licht dat uit de Fabry-Perot interferometer komt, wordt met de lens C gefocusseerd op de spleet van de streak camera.



Figuur 4 De door TPD ontworpen F-PVIS.



**Figuur 5** Door koppelen van het licht naar de meetvezel met aan het uiteinde een GRIN-lens.

## 4 Onderzoek aan de F-PVIS

In 1992 is de theorie van de F-PVIS onderzocht en een eenvoudig ontwerp is ontwikkeld [1]. Het detail ontwerp van de mechanica voor het F-PVIS instrument is uitgevoerd in de eerste helft van 1993. Het uitlijnprocedure van de F-PVIS zijn terug te vinden in Appendix A. Hierna volgt de ontwikkeling van en onderzoek aan de verschillende componenten in de F-PVIS.

### 4.1 Transparant venster in de Fabry-Perot interferometer

De meest essentiële component in dit F-PVIS is de Fabry-Perot interferometer van Burleigh (type RC-150). Op grond van de door PML gestelde eisen komen we tot de volgende specificaties van de Fabry-Perot interferometer:

Finesse	beter dan 20
Reflectiviteit	ca. 95% bij $\lambda=514$ nm

Voor toepassing in het F-PVIS is een transparant venster van ca. 120  $\mu\text{m}$  in de eerste spiegelcoating nodig. Aangezien Burleigh dit niet kan leveren, heeft TPD de fabricage van dit venster onderzocht en uitgevoerd.

De Fabry-Perot interferometer bestaat in het algemeen uit twee extreem vlakke spiegels. Deze wordt gevormd door een reflectie coating op een substraat aan te brengen. Om een zo hoog mogelijke finesse te krijgen is gekozen voor substraten met een vlakheid van  $\lambda/200$ . De diameter van de substraten bedraagt 51 mm. De reflectie coating bestaat in dit geval uit een opgedampte lagenpakket van  $\text{SiO}_2$  en  $\text{TiO}_2$  met een reflectie van ca. 95%.

#### Eerste set substraten (1993)

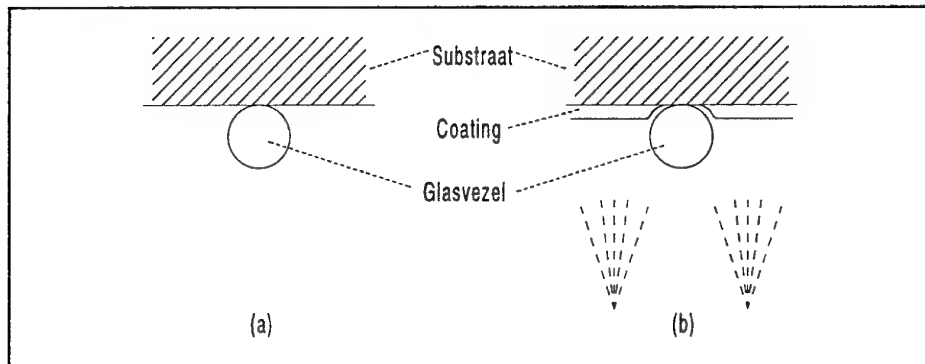
Voor het vervaardigen van het transparante venster in de coating van de eerste set Fabry-Perot substraten zijn er twee methodes onderzocht:

- A1. Glasvezel als masker voor het venster.
- A2. Opdampen van een aluminium strip via een masker in combinatie met het "lift-off" proces.

#### *ad A1*

Hierbij wordt een glasvezel over het te coaten oppervlak van het substraat gespannen. Beide uiteinden zijn aan het substraat vastgelijmd. Tijdens het opdammen van de coating fungeert de glasvezel dan als masker (Fig. 6a). Deze methode heeft twee nadelen. Ten eerste, het coating materiaal blijft onder de vezel te kruipen omdat de bronnen van de opdampmaterialen niet precies onder het substraat zitten (Fig. 6b). Dit leidt tot een venster dat smaller is dan de diameter van de vezel. Bovendien is de reflectie aan dit overgangsgebied onbekend. (Beide effecten zijn zichtbaar op de proefsubstraten.) Het tweede nadeel wordt veroorzaakt door beweging van het substraat. Om een zo homogeen mogelijke coating te krijgen, wordt het substraat tijdens het opdamproces voortdurend in de opdampklok rondgedraaid.

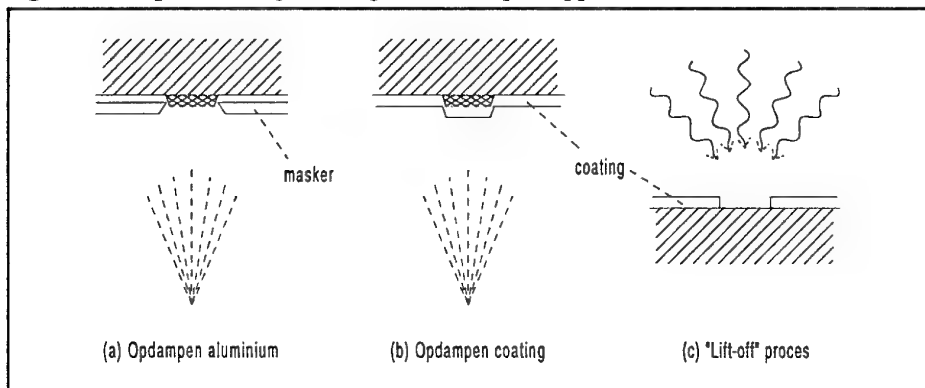
Aangezien de glasvezel alleen aan de uiteinden vastzit, wordt de glasvezel ook in beweging gebracht. Hierdoor heeft de glasvezel geen vaste positie t.o.v. het substraat hetgeen noodzakelijk is voor het gebruik als een opdampmasker. Het gebruik van een aan beide uiteinden vastgelijmde glasvezel als masker blijft derhalve een minder geschikte methode te zijn.



**Figuur 6** Opdampen van een coating met een glasvezel als masker.

#### Ad 2

Het transparante venster in de reflectiecoating wordt gerealiseerd met het "lift-off" proces. Dit is een twee-traps techniek. Eerst wordt een masker met een spleet van ca. 120  $\mu\text{m}$  gebruikt om een aluminium strip op het substraat op te dampen (Fig. 7a). In de tweede stap wordt de vereiste reflectiecoating opgedampt (Fig. 7b). Het geheel wordt dan in een beker met loog in een ultrasoonbad gezet. Het aluminium wordt opgelost en het coatingmateriaal die daarop zit, wordt dan door de ultrasoonische trillingen mechanisch verwijderd. Hiermee kan een venster van ca. 120  $\mu\text{m}$  breed in de reflectiecoating gerealiseerd worden (Fig. 7c). Het proces van oplossen van het onderliggende materiaal en het bovenliggend materiaal ultrasonisch verwijderen wordt "lift-off" genoemd en is een bekende techniek bij het fabriceren van meerlaagsstructuur van IC's. De keuze van aluminium als masker voor het "lift-off" proces is gebaseerd op het feit dat deze zich makkelijk laat oplossen/verwijderen in loog. Bovendien is aluminium bestendig tegen de temperatuur bij het te gebruiken opdampproces (ca. 200  $^{\circ}\text{C}$ ).



**Figuur 7** Opdampen van een aluminium strip. In combinatie met het "lift-off" proces wordt het transparante venster vervaardigd.

Er zijn twee series proeven met de laatste methode (A2) uitgevoerd. Beide leverden ons probleemloos het gewenste transparante venster. Echter, toen de coating op het werkelijke substraat opgedampt werd, mislukte het "lift-off" proces. Wij hebben daarna getracht het "lift-off" proces in andere agressieve middelen uit te voeren. Ook dit heeft geen resultaat opgeleverd. Oorzaak is waarschijnlijk een te goede hechting van het aluminium aan het extreem vlakke substraat. Uiteindelijk heeft PML de gehele coating chemisch verwijderd. Daarna heeft TPD het vervaardigingsproces van de coating met het transparant venster nogmaals uitgevoerd. Ditmaal hadden we geen probleem met het "lift-off" proces. Echter, het oppervlak van het substraat was dusdanig aangetast dat de reflectiecoating niet meer bruikbaar was voor een Fabry-Perot interferometer.

#### **Tweede set substraten (1994-1995)**

In 1994 is onderzoek uitgevoerd naar andere methodes voor het fabriceren van het transparante venster in de reflectiecoating op een nieuwe set substraat met een vlakheid van  $\lambda/200$ . Inmiddels is de brandpuntsafstand van lens A van 100 mm in 80 mm veranderd, en de breedte van het venster is bijgesteld tot ca. 150  $\mu\text{m}$ .

Voor het vervaardigen van dit 150  $\mu\text{m}$  breed venster zijn drie methodes onderzocht:

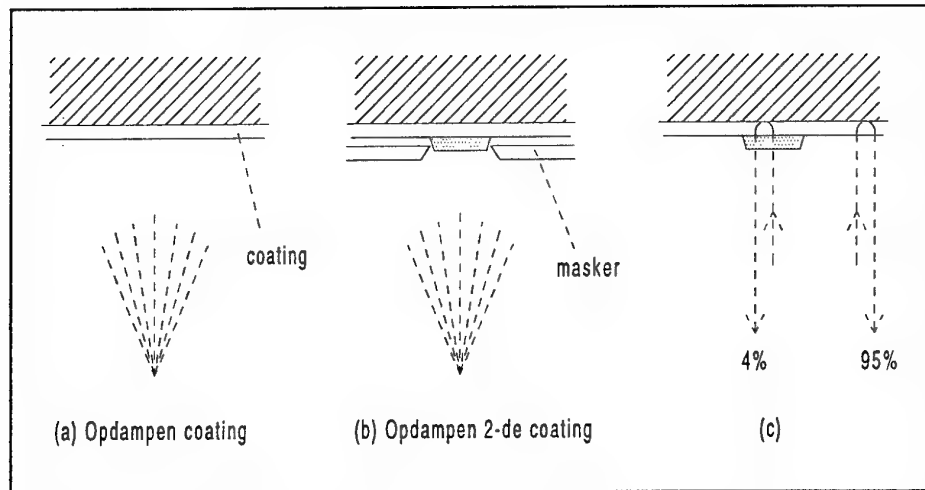
- B1. Het gebruiken van een metalen draad als masker voor het venster
- B2. Het aanbrengen van een strip "compenserende coating" op de plaats van het venster
- B3. Het gebruiken van fotolak als materiaal voor het "lift-off" proces.

##### *ad B1*

Hierbij wordt een metalen draad met een diameter van ca. 150  $\mu\text{m}$  aangespannen en als masker gebruikt voor het opdampen van het lagenpakket. Verder wordt het substraat in de opdampklok niet meer rondgedraaid. Deze methode is mechanisch stabiel dan die met een gelijmde glasvezel (A1). Voordeel van deze methode is dat het vereiste lagenpakket met de spleet in één keer vervaardigd kan worden. Bij de eerste proef bleek echter dat er nog steeds spraak is van onderkruipen van het opdamp materiaal.

##### *ad B2*

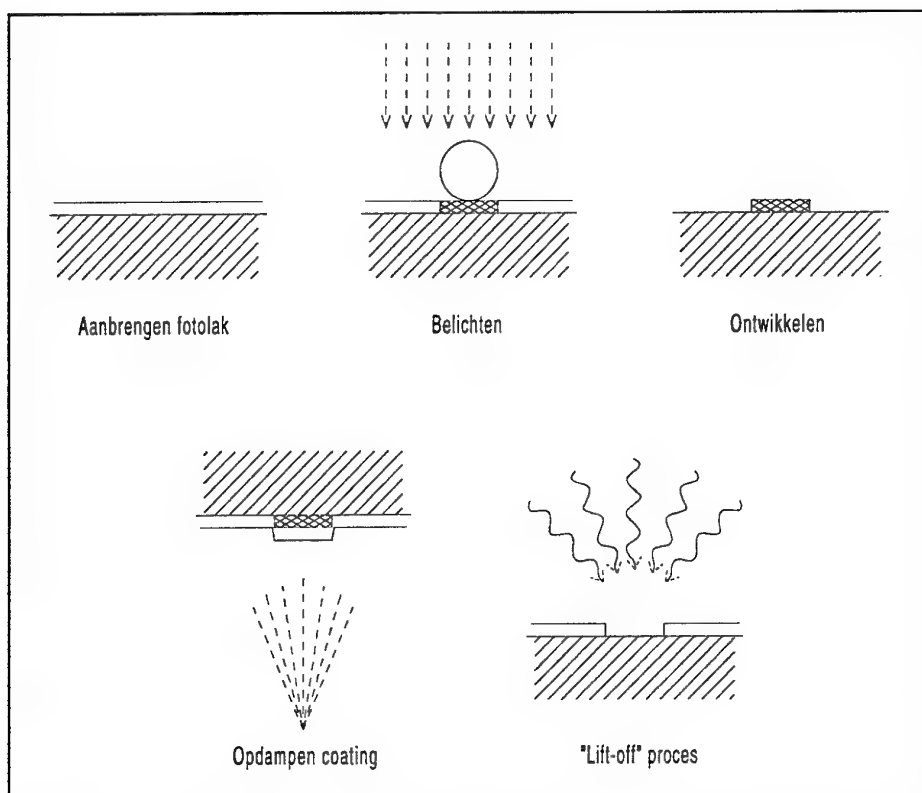
De tweede methode is een twee-traps techniek. Op het substraat wordt eerst het gewenste lagenpakket met een reflectie van 95% voor 514 nm opgedampt (Fig. 8a). Daarna wordt m.b.v. een masker een strip "compenserend" lagenpakket opgedampt (Fig. 8b). Dit lagenpakket is zo ontworpen dat dit in combinatie met het bestaande hoogreflecterend lagenpakket een aanmerkelijk lagere reflectie van ca. 4% zal leveren (Fig. 8c). Echter, de breedte van deze transmissie piek (als functie van de golflengte) is zeer smal. Bij een afwijking van 2 resp. 4 nm op de optimale golflengte van 514 nm, neemt de reflectie al toe tot 12 resp. 30% (Appendix B). Dit houdt in dat de coating met zeer grote precisie opgedampt moet worden. Het vervaardigen van een dergelijk lagenpakket voor een specifieke golflengte was volgens de opdampers van de TUD niet haalbaar met de toen aanwezige apparatuur. (Met de huidige nieuwe opdampinstallatie behoort deze methode wel tot een goede alternatief)



**Figuur 8** Aanbrengen van een strip "compenserend" coating voor het reduceren van de reflectie.

*ad B3*

Op het substraat wordt eerst een laag fotolak van enkele tot tientallen  $\mu\text{m}$ 's aangebracht. Een veelgebruikte en betrouwbare methode om fotolak op een substraat aan te brengen is het opspinnen. Daarna wordt een masker in de vorm van een gespannen metalen draad van  $150\ \mu\text{m}$  in diameter aangebracht en wordt de fotolak belicht. Na ontwikkelen blijft er dan een strip van  $150\ \mu\text{m}$  brede fotolak over, welke gebruikt kan worden voor het "lift-off" proces in aceton (Fig. 9). Het gebruiken van fotolak als masker voor het opdampen van de reflectiecoating vereist een lagere opdamptemperatuur tot ca.  $100\ ^\circ\text{C}$ . Het onder deze temperatuur opgedampte lagenpakket vertoont volgens de opdamperij van de vakgroep optica een absorptie van slechts enkele promille. Dit heeft in het geval van de F-PVIS geen consequentie voor het systeem.



**Figuur 9** Het gebruik van fotolak als materiaal voor het "lift-off" proces voor het vervaardigen van een transparant venster in de coating.

#### Het vervaardigen van het transparante venster in de reflectiecoating

Uiteindelijk is gekozen voor methode B3 voor het vervaardigen van het transparante venster in de reflectiecoating van de tweede set substraten. Om tot een optimaal proces te komen zijn met behulp van de faciliteiten van de vakgroep Optica van TUD de volgende onderzoeken en experimenten uitgevoerd:

##### - Te gebruiken fotolaklaag

De gebruikte fotolak is van het type Shipley 8105. De dikte van de fotolaklaag is o.a. afhankelijk van de spinsnelheid, tijdsduur van het spinnen en de verdunning van de fotolak. Aangezien voor een zo effectief mogelijke "lift-off" proces een zo dik mogelijke fotolak laag gewenst is, is gekozen voor een lage spinsnelheid en een korte spintijd in combinatie met een 1:1 verdunde fotolak. Na het aanbrengen van de fotolak wordt het substraat gedurende 5 minuten op een bakplaat met een temperatuur van 70 °C gelegd. Dit proces, het voorbakken, zorgt ervoor dat het in de fotolak nog aanwezige oplosmiddel grotendeels verdampt. Hiermee wordt de fotolak enigszins gehard. Het harder worden van de fotolak heeft als voordeel dat het onbelichte deel van de fotolak minder aangetast wordt door de ontwikkelaar. Een ander voordeel van het voorbakken is dat de hardere fotolak beter bestendig is tegen contact met de masker in de vorm van een metalen draad.

- *Belichtingsmasker*

We zijn begonnen met een fotografische film als masker voor het realiseren van de gewenste strip in de fotolak. Echter, het contrast van de fotografische film voor ons doel niet voldoende en bovendien was er een overgangsgebied van ca. 10  $\mu\text{m}$  tussen het transparante en het zwarte gedeelte van de film. Uiteindelijk hebben we gekozen voor een strak gespannen metalen draad van 150  $\mu\text{m}$  in diameter als belichtingsmasker (Fig. 9).

- *Benodigde belichtingstijd*

Voor het belichten van de fotolak wordt het standaard UV belichtingsapparaat van de vakgroep optica gebruikt. Experimenten zijn uitgevoerd met verschillende belichtingstijden (1, 2, 4 en 8 s). Voor de uiteindelijk gebruikte fotolaklaag bleek een belichtingstijd van 2 s optimaal te zijn.

- *Invloed van het gebruik van fotolak op het opdampen van de reflectiecoating*

Eerder is al aan de orde geweest dat voor het gebruik van fotolak als masker voor het opdampen van de reflectiecoating, een lagere opdamptemperatuur nodig is. Hierbij neemt de absorptie van het lagenpakket enigszins toe. Verder bestaat het gevaar dat de fotolak tijdens het opdampproces gaat "uitgassen" en het verdampte materiaal op de coating neerslaat. Experimenten wezen echter uit dat er geen waarneembare verandering is in de kwaliteit van de coating.

- *Geschiktheid van de gebruikte fotolak voor het "lift-off" proces*

Het "lift-off" proces wordt uitgevoerd in aceton. De reflectiecoating blijkt goed bestendig te zijn tegen aceton. Bij het proefproces werd de fotolak probleemloos door de combinatie aceton en ultrasoon bad opgelost/verwijderd.

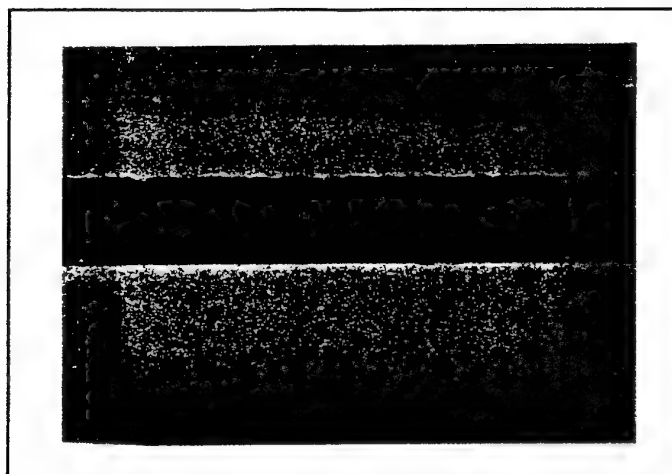
**Procedure voor het vervaardigen van het transparante venster**

Uiteindelijk kwamen wij tot de volgende procedure voor het vervaardigen van het transparante venster in de reflectiecoating van de tweede set substraten.

1. Opspinnen van de fotolak (1:1 verdunde Shipley 8105) met een Moulinex spin apparaat. De spinsnelheid wordt m.b.v. de spanning geregeld. Deze wordt ingesteld op 50 V. De spintijd is 10 s.
2. Voorbakken van de fotolaklaag op 70 °C gedurende 5 minuten.
3. Afkoelen van het substraat.
4. Belichten van de fotolak na het aanbrengen van een gespannen metalen draad van 150 µm in diameter. De belichtingstijd bedraagt 2 s.
5. Ontwikkelen van de fotolak in een 1:5 verdunde ontwikkelaar (Shipley 351). Ontwikkeltijd is 60 s.
6. Nabakken van de fotolak (3 minuten op 70 °C en 5 minuten op 100 °C). Hierbij wordt het in de fotolak nog aanwezige oplosmiddel verwijderd, waardoor het "uitgassen" van de fotolak tijdens het opdampproces geminimaliseerd wordt.
7. Opdampen van de reflectiecoating bestaande uit 13 lagen van afwisselend  $\text{TiO}_2$  en  $\text{SiO}_2$ . Na de zevende laag wordt een pauze genomen om het substraat enigszins te laten afkoelen.
8. "Lift-off" proces in aceton in een ultrasoon bad.

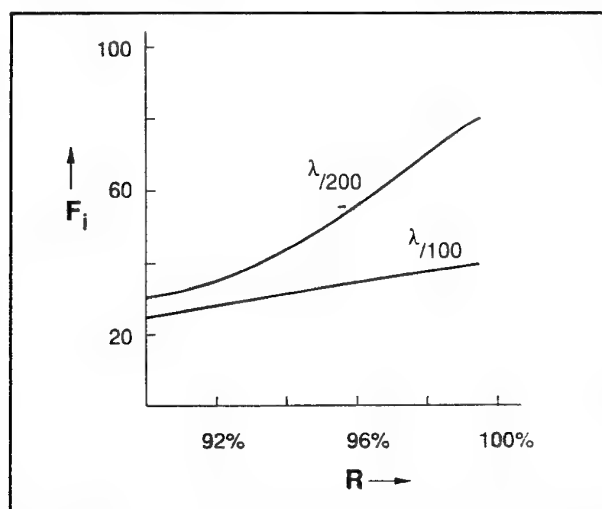
Na een aantal geslaagde proefprocessen (Fig. 10) werd de feitelijke coating in eind 1994 op de tweede set substraat aangebracht. Het resultaat hiervan is het volgende: de breedte van het transparante venster is ongeveer 145 µm geworden en de reflectie van de coating bedraagt 96% voor 514 nm. Op een aantal plaatsen op het venster is het "lift-off" niet geheel geslaagd. Hierdoor is het venster niet over zijn gehele lengte van ca. 51 mm transparant. De totale lengte van de niet transparante stukken is ca. 1 mm. Aangezien het transparante venster als doel heeft om licht in de Fabry-Perot interferometer te koppelen, leidt het niet geheel transparante venster alleen tot een reductie in de hoeveelheid licht van ca. 2% (= 1mm/51mm).

Verder is op enkele plaatsen onvolkomenheden in de coating waarneembaar. Deze worden veroorzaakt door het schurende effect van de houder op de coating tijdens het ultrasoon trillen. Deze onvolkomenheden hebben verder geen nadelig effect op de werking van de Fabry-Perot interferometer.



**Figuur 10** Resultaat van een proefproces.

In begin 1995 is de finesse van de Fabry-Perot interferometer onderzocht. Volgens Burleigh zal een set  $\lambda/200$  spiegels met een reflectiviteit van 96% een maximale finesse hebben van ca. 55 (Fig.11). Uit verschillende metingen blijkt dat de finesse van de onderzochte Fabry-Perot interferometer gelijk is aan ca. 48 [2]. Gezien het kleine verschil tussen de maximaal haalbare finesse en de gemeten finesse, mogen we concluderen dat de gerealiseerde reflectiecoating met een transparant venster geschikt is voor toepassen in de F-PVIS.



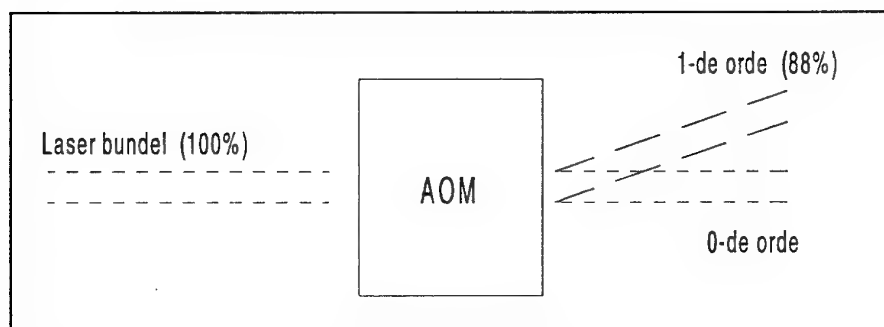
**Figuur 11** Finesse van een Fabry-Perot interferometer als functie van de reflectiviteit R van de coating.

## 4.2 De glasvezel

In de F-PVIS wordt een glasvezel (step-index, 100/140) gebruikt voor het transporteren van het licht naar de MAP. Aangezien het uiteinde van de vezel (met een GRIN lens) bij elk experiment vernietigd wordt, is gekozen voor een systeem voor het doorkoppelen van het licht naar een tweede meetvezel (Fig. 5). In het begin van dit onderzoek werd een ST type connector systeem gebruikt. Dit connector systeem veroorzaakt echter vaak een veel te hoge reflectie welke door de F-PVIS als achtergrond signaal wordt gezien. In 1995 is het connector systeem vervangen door glasvezel splices (mechanische hulpstuk voor het verbinden van twee kale glasvezels). Op dit moment worden er twee typen splices gebruikt (Fingersplice en Ultrasplice).

## 4.3 De akoesto-optische modulator

In de F-PVIS gebruiken we een akoesto-optische modulator (AOM) als sluiters (IntraAction Corp., model AOM-40). Bij aanwezigheid van een stuursignaal wordt de bundel afgebogen (Fig. 12). Alleen de eerste orde van de bundel wordt in de vezel gekoppeld. Hierbij is het rendement van de AOM van belang. De verhouding van de intensiteit in de 1-de orde bundel en de oorspronkelijke bundel blijkt 58:66 te zijn. De AOM heeft dus een rendement van ca. 88%. De modulatie diepte van de intensiteit van beide ordes zijn nagenoeg 1. Verder hebben we kunnen constateren dat de 1-de orde bundel, in de diffractie richting van de AOM, iets breder is dan de oorspronkelijke bundel. Dit is volgens de leverancier een eigenschap van de AOM en heeft verder geen consequentie voor de F-PVIS.



**Figuur 12** Afbuigen van de laser met een AOM.

In 1993 hadden we steeds problemen met een te lage intensiteit op de film van de streakcamera. Later blijkt de diffractie van de 1-de orde afhankelijk te zijn van de vorm van het stuursignaal van de AOM (continu of een enkele puls) [3]. Het uitlijnen van het systeem voor het inkoppelen van het laserlicht in de glasvezel werd namelijk uitgevoerd met een stuursignaal met een "duty-cycle" van 50%.

Wanneer het systeem uitgelijnd is, wordt het stuursignaal uitgezet en later tijdens de experiment met een triggering van de MAP zeer kort ingeschakeld (enkele puls). Door het verschil in het stuursignaal van de AOM verandert de voortplantingsrichting van de 1-de orde bundel en het licht wordt naast de vezel i.p.v. in de vezel gefocusseerd. Later wordt de inkoppeling uitgevoerd met een zeer kleine "duty-cycle" van het stuursignaal.

#### **4.4        Verbreden van de laserbundel met een beamexpander**

Het inkoppelrendement van het laserlicht in de glasvezel blijkt afhankelijk te zijn van het vermogen van de laser. Bij een vermogen van ca. 0.1 W bedraagt het inkoppelrendement ca. 65%. Terwijl bij een vermogen van ca. 1 W, het inkoppelrendement gereduceerd wordt tot minder dan 50 %. Uit meting van begin 1994 kwamen we er achter dat de diameter van de bundel uit de laser afneemt met het vermogen.

Bij het focuseren van een evenwijdige bundel, afgezien van effecten van aberratie, is de afmeting van de spot in de focus omgekeerd evenredig met de diameter van de bundel. Bij de Argon laser van PML wordt de spot dus groter naarmate het vermogen van de laser hoger wordt. Hierdoor is het mogelijk dat de spot bij een hoog vermogen van de laser niet meer goed past in de kern van de glasvezel. Dit leidt tot een lager inkoppelrendement. Oplossing van dit probleem is het gebruik van een beamexpander voor het vergroten van de diameter van de bundel. Bij het gebruik van een 2x beamexpander, bestaande uit 2 lenzen met een brandpuntsafstand van 10 mm en 20 mm, blijkt dat het inkoppelrendement bij een hoog vermogen van de laser verhoogd is tot ca. 75%.

#### **4.5        Efficiëntie van het bundel-transport systeem**

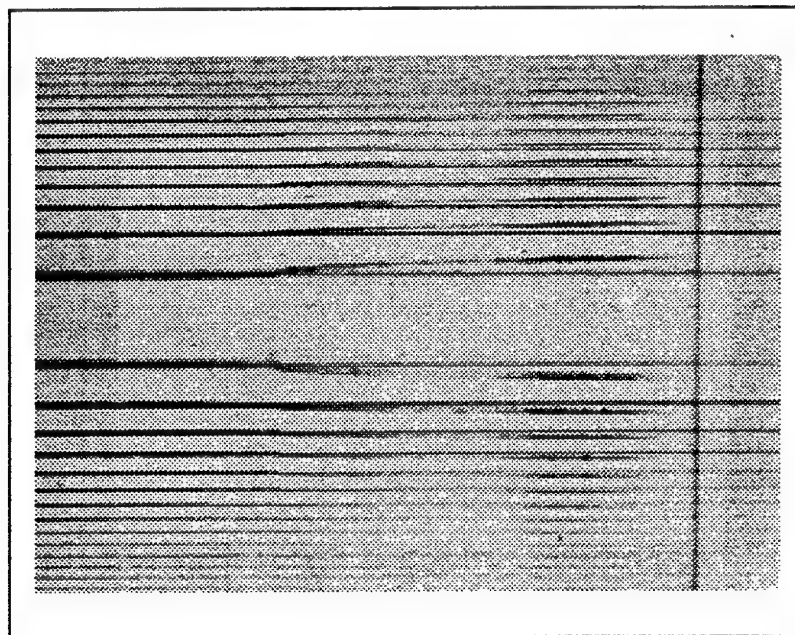
De spot's uit de F-PVIS worden op de film van de streak camera vastgelegd. Een zo klein mogelijk verlies van het beschikbare licht is dus gewenst. In de F-PVIS worden dan ook zo veel mogelijk optische componenten met een antireflectie coating gebruikt om de transmissie te maximaliseren. Het bundel-transport systeem bestaat echter nog uit ongecoate prisma's (Fig. 4). De prisma's zijn doorgemeten in begin 1994 en hebben een transmissie van resp. 90%, 94% en 92%. De totale transmissie van het systeem van 3 prisma's is dus ca. 78%. Dit kan in de toekomst nog verbeterd worden door het gebruiken van laserspiegels met een transmissie van beter dan 99%. Dit zal een verbetering van ca. 25% leveren. Een alternatief is het aanbrengen van anti-reflectie coating op de prisma's.

#### 4.6 Coating op flyer

Om licht terug in de glasvezel te kunnen reflecteren hebben we de flyer van een reflecterende coating voorzien. Aanvankelijk wordt een aluminium coating gebruikt. In combinatie met een mechanisch aangebrachte oppervlakruwheid zal het oppervlak van de flyer enigszins diffuus reflecteren. Hiermee kan de kanteling van de flyer enigszins worden gecompenseerd. De reflectie van de flyer met een aluminium coating blijkt vlak na de stroompuls van de MAP te verdwijnen. Oorzaken kunnen zijn:

- een te sterke kanteling van de flyer en dus verandering van de richting van het gereflecteerd licht en/of
- verandering in (de reflectiviteit van) de coating tijdens de vlucht als gevolg van een schokgolf in de flyer of een te hoge wervelstroom inkoppeling in de coating

Na overleg met de opdamperij van de vakgroep optica (TUD) wordt nu een goud coating met een chroom tussenlaag toegepast. De chroom tussenlaag van enkele nm dik zorgt voor een goede hechting van het goud. Dit type coating geeft een betere resultaat. Maar de door de GRIN lens opgevangen intensiteit blijft vaak wegvallen. In sommige gevallen komt die na een tijd weer terug (Zie Fig. 13).



**Figuur 13** Voorbeeld van een meting met een variërende intensiteit.

PML zal in de nabije toekomst een aantal experimenten uitvoeren om de precieze oorzaak van de verandering in de intensiteit te achterhalen. Op grond van de resultaten zal TPD zich beraden over een oplossing.

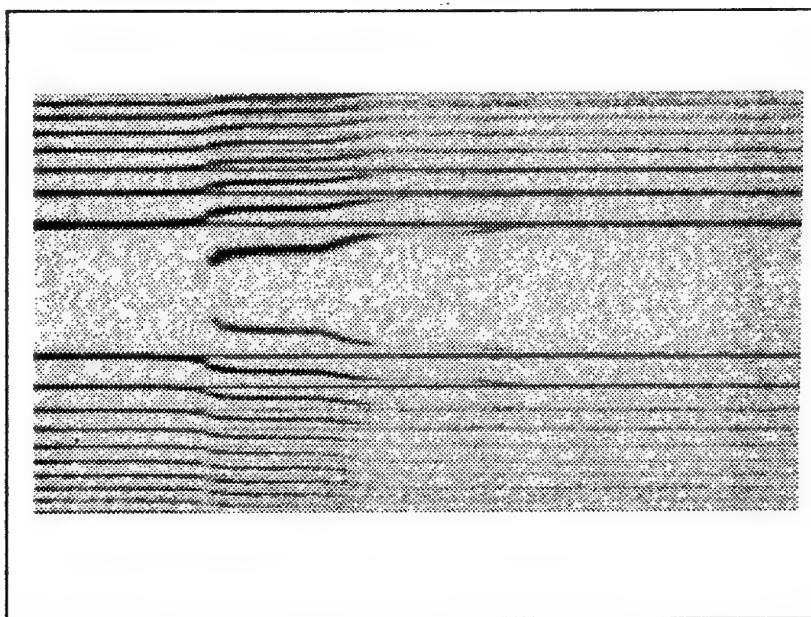
Een alternatief voor een metalen coating op de flyer is het aanbrengen van retroreflecterend materiaal op de flyer. Dit heeft echter als nadeel een niet verwaarloosbare dikte en gewicht, en kan alleen toegepast worden bij een dikkere flyer. Bovendien blijkt de reflectiviteit weg te vallen bij snelheden groter dan ca. 3 km/s.

## 5 Metingen met de F-PVIS

De F-PVIS is een systeem dat een golflengteverschuiving omzet in de positieverandering van een aantal gefocusseerde spot's. Dit systeem blijkt voor diverse typen metingen van het PML ingezet te kunnen worden. Uit meetresultaten van het PML volgt dat de tijdsresolutie van dit systeem ca. 10 ns is. De snelheidsresolutie is, afhankelijk van de instelling van de F-P interferometer, beter dan 100 m/s en het meetbereik kan meer dan 20 km/s bedragen.

### 5.1 Snelheid van de flyer

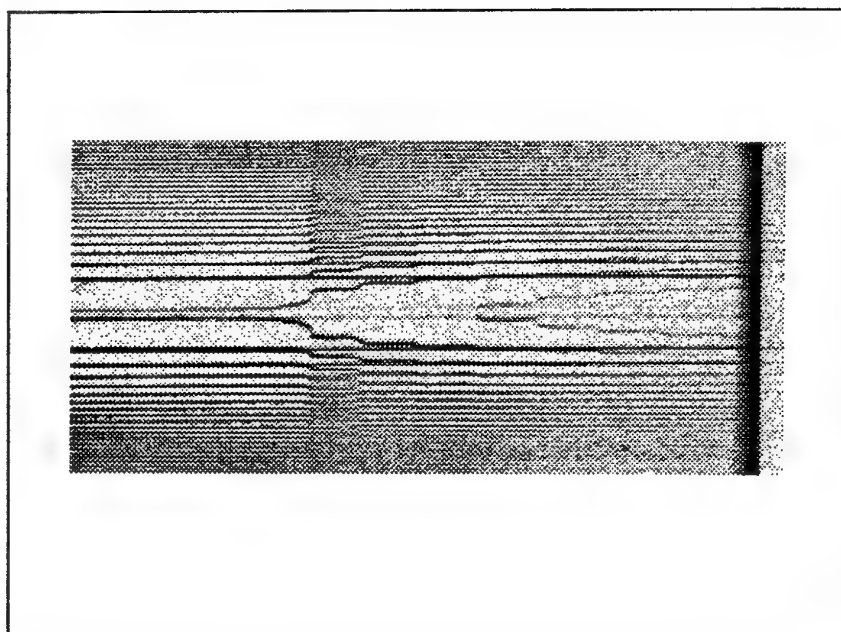
De F-PVIS is in de eerste instantie ontworpen voor het meten van de snelheid van de flyer welke van essentieel belang is voor de MAP. Het aan de bewegende flyer gereflecteerde licht wordt door de GRIN lens opgevangen en met de glasvezel naar de F-PVIS getransporteerd. Indien retro-reflecterend materiaal op de flyer is aangebracht voor het reflecteren van het opvallende licht, dan kunnen de spot's gemakkelijk met de streakcamera nauwkeurig geregistreerd worden. Een voorbeeld van meting van snelheid aan een met retro-reflecterend materiaal gecoate flyer is weergegeven in Fig. 14.



**Figuur 14** Opname van meting aan een met retro-reflecterend materiaal gecoate flyer.

Nadeel van het retro-reflecterende materiaal is dat dit t.o.v. de flyer relatief dik is. De invloed van de aanwezigheid van dit materiaal op de flyer is dan niet verwaarloosbaar. Een betere methode zal zijn het opdampen van een reflecterend metaallaag op de flyer. Problemen met het metaallaag zijn reeds in Par. 4.6 besproken.

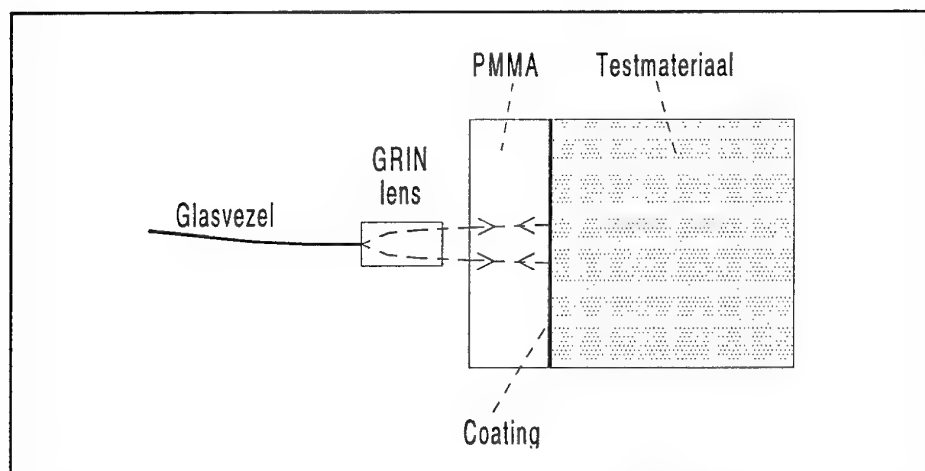
Ondanks de problemen met de metalen coating heeft PML een aantal geslaagde metingen uitgevoerd. Een voorbeeld van meting aan een flyer met een chroom-goud coating is weergegeven in Fig. 15.



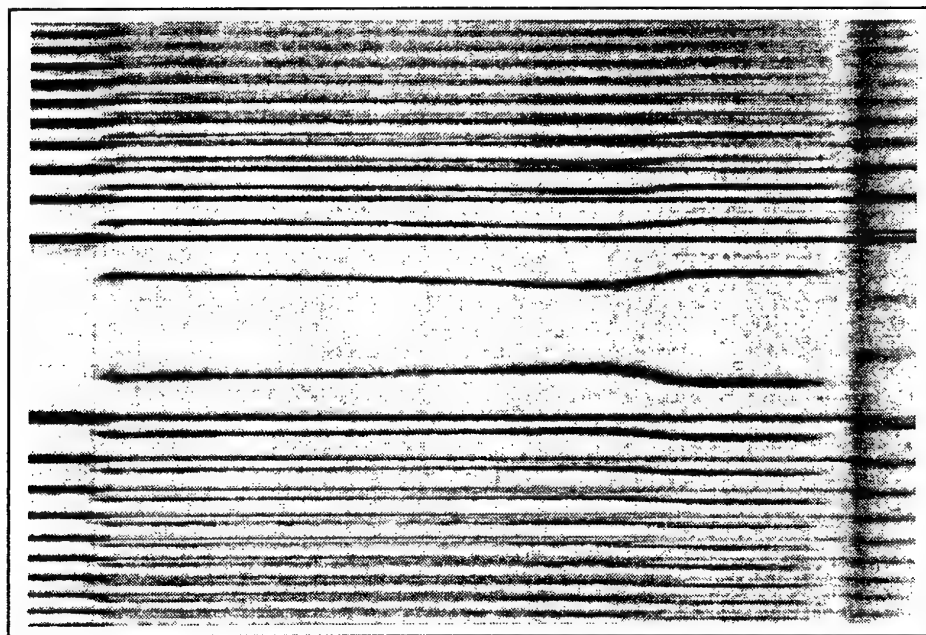
**Figuur 15** Meting aan een flyer met een chroom-goud coating.

## **5.2 Bepalen van de schokgolf door middel van oppervlaksnelheid**

Een tweede type meting met de F-PVIS dat door PML is uitgevoerd, is het meten van de oppervlaksnelheid van het grensvlak testmateriaal - buffermedium (PMMA). Op dit grensvlak is een reflecterend goudlaag opgedampt (Fig. 16). Uit het meetresultaat (Fig. 17) kan de schokgolf aan het uiteinde van het testmateriaal berekend worden.



**Figuur 16** Het meten van snelheid aan het grensvlak PMMA - testmateriaal.



**Figuur 17** Meting van de oppervlaksnelheid van een reflecterend grenslaag.

### **5.3       Andere toepassingsmogelijkheden van de F-PVIS in de MAP**

Naast de eerder genoemde metingen zal de F-PVIS nog toegepast kunnen worden voor andere typen metingen in de MAP. Een concrete mogelijkheid is het bepalen van deeltjessnelheid binnen in het testmateriaal. Hieruit kan het profiel van de schokgolf in het testmateriaal bepaald worden. Dit is vooral van belang bij situaties waarin het profiel van de schokgolf verandering vertoont tijdens het voortplanten door het testmateriaal. Door een aantal sensoren op bekende afstanden te zetten, is het zelfs mogelijk de schokgolf snelheid te bepalen. Onderzoek aan dit type meting wordt in Hst. 6 behandeld.

## 6 Bepalen van het profiel van de schokgolf in het testmateriaal

Bij de divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid van PML worden geruime tijd experimenten uitgevoerd met de MAP. Hiermee wordt inslag van de flyer op o.a. springstoffen gesimuleerd. Verder wordt er onderzoek verricht aan het comprimeren van keramische materialen met behulp van explosieven. In beide experimenten bestaat de behoefte aan een systeem voor het meten van het profiel van de schokgolf in het testmateriaal. Verder is ter minimalisering van verstoringen aan het testmateriaal een zo klein mogelijke sensorprobe gewenst. In verband met zijn kleine afmeting en de bestendigheid tegen zeer hoge druk is glasvezel uiterst geschikt als sensorprobe.

De wensen van PML voor de schokgolf meting zijn:

- druk : max. 70 GPa
- tijdsresolutie : enkele ns
- duur van meting : meer dan 100 ns
- snelheid van schokgolf : max. 10 km/s

De mogelijke meetprincipes van een glasvezel druksensor zijn:

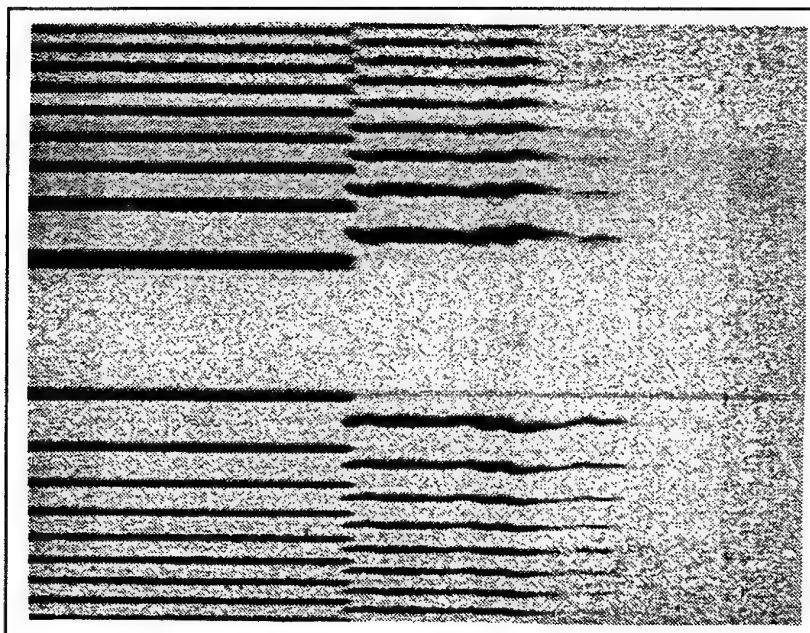
- C1 Meten van de deeltjessnelheid van het eindvlak van een vezel
- C2 Een polarimetrische glasvezel sensor
- C3 Een glasvezel interferometer
- C4 In-fiber Bragg tralie

### *ad C1*

Een veelbelovende mogelijkheid om de schokgolf in het testmateriaal te meten is het meten van de lokale deeltjessnelheid in het testmateriaal. De speciaal voor de MAP ontwikkelde F-PVIS zal hiervoor gebruikt kunnen worden.

De sensorprobe bestaat dan uit een glasvezel waarvan het eindvlak met een geschikt reflecterend materiaal is gecoat. De keuze van het materiaal van de coating is zeer belangrijk. Deze moet immers die hoge druk kunnen doorstaan. Verder moet dit materiaal op controleerbare wijze aan het eindvlak van de vezel aangebracht kunnen worden (b.v. via opdampen). De vezel met een reflecterend eindvlak wordt in het testmateriaal geplaatst. Dit eindvlak zal dezelfde deeltjessnelheid hebben als het testmateriaal er om heen. De door het bewegende eindvlak veroorzaakte Doppler verschuiving wordt dan gedetecteerd m.b.v. de F-PVIS. Uit de snelheid van het reflecterende eindvlak kan het profiel van de schokgolf worden afgeleid. Voor de inleidende experimenten van deze meetmethode zijn er eind 1995 een aantal 100/140 vezels met chroom opgedampt. Er zijn nog geen experimenten met deze vezels uitgevoerd.

Om de bruikbaarheid van deze methode te verifiëren is bij PML een experiment uitgevoerd in PMMA. Op het uiteinde van de glasvezel wordt een laag zilververf aangebracht. Vervolgens wordt de glasvezel midden in een stuk PMMA geplaatst. Tijdens het passeren van de schokgolf is de Doppler verschuiving, welke geregistreerd is met de F-PVIS, duidelijk waarneembaar (Fig. 18). Hiermee is de toepasbaarheid van dit methode aangetoond.



**Figuur 18** Meting van de deeltjessnelheid in PMMA via de deeltjessnelheid van het eindvlak van een vezel.

*ad C2*

In tegenstelling tot methode C1, is de polarimetrische glasvezel sensor gebaseerd op verandering van fysische eigenschappen van de glasvezel. Licht uit een laser wordt onder een hoek van  $45^\circ$  met de optische assen van een PM (Polarization Maintenance) vezel gekoppeld. Na reflectie aan de spiegellende coating op het uiteinde van de vezel wordt het faseverschil in beide optische assen geanalyseerd. Bij een gegeven type vezel is het faseverschil een functie van het optische weglengteverschil. Onder drukbelasting treedt er een verandering in de optische weglengte van de vezel op, welke resulteert in een verandering van het faseverschil tussen licht van beide optische assen. Op dit moment is er geen informatie bekend over een dynamisch model van een glasvezel onder zeer hoge drukvariatie. Verder is het effect van de Doppler verschuiving als gevolg van verplaatsing van het reflecterende eindvlak onbekend. Beide punten moeten nader onderzocht worden voordat deze meetmethode toegepast kan worden voor het bepalen van het profiel van de drukpuls in het testmateriaal.

*ad C3*

In plaats van een polarimetrische sensor (C2), kan de verandering in optische lengte van de vezel ook bepaald worden m.b.v. een interferometer. De glasvezel interferometer heeft dezelfde nadelen als de polarimetrische sensor n.l. de onbekende relatie tussen drukvariatie en de fysische eigenschappen van de vezel, en de invloed van de Doppler verschuiving. Voordeel van de glasvezel interferometer t.o.v. de polarimetrische sensor is een hogere gevoeligheid.

*ad C4*

De verandering van de fysische eigenschappen van de glasvezel kan ook bepaald worden met een nieuwe type sensor, het zogenaamde in-fiber Bragg tralie. Deze bestaat uit een periodieke brekingsindexvariatie in een mono-mode glasvezel. Zoals bij een normaal tralie, wordt licht dat aan bepaalde voorwaarde voldoet, gereflecteerd door het in-fiber Bragg tralie. De golflengte  $\lambda_B$  van het licht dat door een het in-fiber Bragg tralie gereflecteerd wordt, is afhankelijk van de effectieve brekingsindex  $N_{eff}$  van de vezel en de periode  $p$  van het tralie. Waarbij  $N_{eff}$  een functie is van o.a. de brekingsindex  $n$  en de kerndiameter van de vezel. Er geldt:

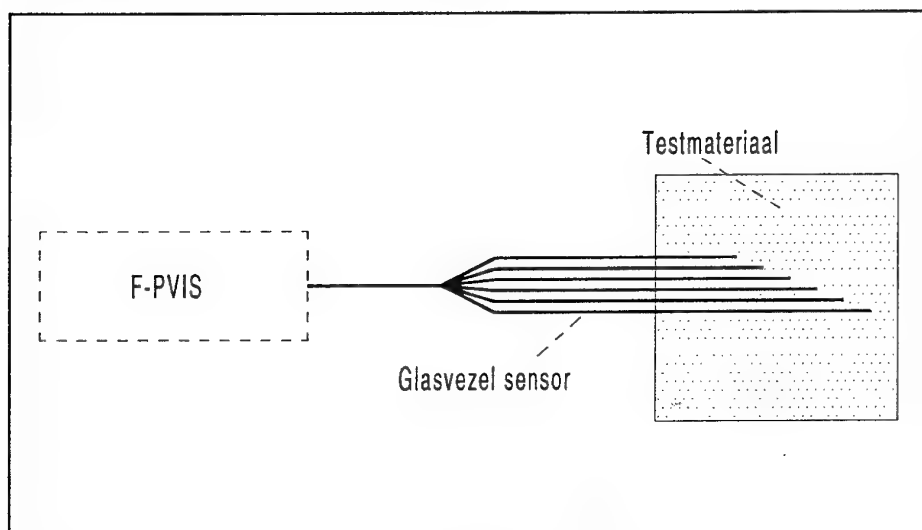
$$\lambda_B = 2N_{eff}p \quad . \quad (6)$$

Bij toepassing van het in-fiber Bragg tralie als sensor, introduceert de te meten fysische grootheid een verandering in de periode  $p$  van het in-fiber Bragg tralie en/of de brekingsindex  $n$  van de glasvezel. Beide veranderingen veroorzaken een verschuiving in de golflengte  $\lambda_B$  welke door het tralie gereflecteerd wordt (zie Verg. (6)). De verandering in  $\lambda_B$  kan met een spectrometer of met de F-PVIS gemeten worden. De bekendste fysische grootheden die  $p$  en/of  $n$  kunnen veranderen zijn de temperatuur en de rek  $\epsilon$  in de vezel. Voor het bepalen van (zeer hoge) druk met behulp van het in-fiber Bragg tralie is er in de literatuur nog weinig bekend.

Behalve de methode C4 zal er altijd een reflecterende coating opgedampt moeten worden op het uiteinde van de glasvezel. Verder moet het opdampen bij een relatief lage temperatuur plaatsvinden om beschadiging (smelten) van de kunststof mantel van de glasvezel te voorkomen. De volgende materialen kunnen bij de opdamperij van TUD "koud" opgedampt worden: Al, Ag, Au, Co, Cr, Ge, Ni, Pt, Ti,  $Al_2O_3$ ,  $HfO_2$ , LiF,  $Ta_2O_5$  en  $TiO_2$ . In principe heeft een metalen coating de voorkeur boven diëlectrisch materiaal vanwege een hoge reflectie bij een geringe dikte van vaak minder 100 nm. Bij diëlectrische materialen moeten we voor een reflectie van meer dan 10% al aan een lagenpakket denken. In 1996 zal het optimale coatingmateriaal experimenteel gevonden moeten worden. Zoals vermeld in ad. C1, is er al een start gemaakt met de chroom coating.

In de toekomst zal een literatuuronderzoek naar alle mogelijke meetmethoden worden uitgevoerd. Parallel hieraan zal worden geëxperimenteerd met de methode C1. Uit de resultaten van het literatuuronderzoek en de experimenten zal een keuze voor de meest geschikte meetmethode gemaakt kunnen worden.

Wanneer het meten van het profiel van de schokgolf in het testmaterialen met succes uitgevoerd kan worden, kunnen we dit meetsysteem op een simpele wijze uitbreiden voor het meten van de schokgolf snelheid. Hierbij worden verschillende glasvezel sensorprobe's (gebaseerd op spiegelend eindvlak of in-fiber Bragg tralie) op verschillende posities langs de voortplantingsrichting van de schokgolf geplaatst (Fig. 19). De aankomsttijd van de schokgolf bij de sensorprobe's worden gemeten met de F-PVIS. Bij bekende afstanden tussen de sensorprobe's kan de schokgolf snelheid worden berekend.



**Figuur 19** Bepalen van de schokgolf snelheid m.b.v. aantal glasvezel sensoren die ontworpen zijn voor het meten van de schokgolf in het testmateriaal.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport zijn de werkzaamheden beschreven met betrekking tot de ontwikkeling van een interferometrisch meetsysteem (F-PVIS) voor bepaling van de snelheid van een flyer in de Mega Ampère Pulser van het PML. Na deze ontwikkeling kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

1. De meest essentiële component in de F-PVIS, de Fabry-Perot interferometer, is met succes ontwikkeld en beproefd. De uiteindelijke Fabry-Perot interferometer blijkt goed te werken.
2. Snelheidsmetingen met de F-PVIS worden met succes uitgevoerd. De specificaties van de F-PVIS overtreft de eisen van het PML.
3. Met behulp van de F-PVIS kan een aantal andere afgeleide metingen uitgevoerd worden. Voorbeelden zijn: profiel van schokgolf aan het uiteinde en middenin het testmateriaal. De eerste resultaten van deze metingen zijn zeer bemoedigend.
4. De mogelijkheid om het profiel van de schokgolf middenin het testmateriaal te meten is voor zover bekend nog niet getoond in de open literatuur.

Enkele aanbevelingen voor de F-PVIS zijn:

1. Verder ontwikkelen en optimaliseren van de F-PVIS tot een robuust en gebruiksvriendelijk systeem.
2. Onderzoek naar een geschikte reflectie coating voor de flyer.
3. Ontwikkelen van de afgeleide metingen met de F-PVIS.

### Referenties

- 1 L.K. Cheng en A.J.A. Bruinsma, "Ontwerp van een F-PVIS voor het meten van zeer hoge snelheid in experimenten met de MAP", TNO-rapport TPD-HOI-RPT-92-291, 30 september 1992.
- 2 L.K. Cheng, "Finesse van de nieuwe set spiegels voor de F-PVIS", Memorandum TPD-HOI-MEMO-950052, 28 februari 1995.
- 3 M. van de Griend, "Fabry-Perot Interferometer System - De opbouw en ontwikkeling van de meetopstelling", TNO-rapport PML 1993-IN10, juni 1993.
- 4 W. Prinse, "The shock Hugoniot of aluminum nitride compacts", Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Rate Phenomena, L.E. Mur (Ed.), Elsevier Science, Amsterdam, 1995.

**Appendix A    Uitlijnprocedure van de F-PVIS**

1.    Uitlijnen van AOM (bij 1.5 W).
2.    Uitlijnen van de prisma's P1 en P2.
3.    Uitlijnen van "beamexpander" voor een evenwijdige bundel.
4.    Grof uitlijning prisma P3.
5.    Optimaliseren stand van glasvezel voor minimale reflectie aan de vezeloppervlak in het F-PVIS systeem.

**UITLIJNING TOT EN MET PRISMA P2 NIET MEER VERANDEREN**

6.    Uitlijnen positie van vezel door vezel via andere uiteinde in te koppelen.
  - \* Bij afbeelden van vezel op de spleet van de streak camera moet het licht optimaal op de spiegel van de streak camera vallen (x, y uitlijning). De vezel staat dan op de goede hoogte.
  - \* positioneer de vezel in het brandvlak van lens A voor het collimeren van de bundel (z uitlijning).
7.    Uitlijnen van F-P bij afwezigheid van cilinderlens. Daarna moet de coating van de F-P loodrecht op de evenwijdige bundel uit lens A worden afgesteld.
8.    Uitlijnen van cilinderlens B.
9.    Inkoppelen in vezel via instellen van de prisma's P2 en P3.
10.    Uitlijnen lens C (y richting).

**Appendix B Reflectie van coating met een compenserend lagenpakket**

## Environment Data:

Reference wavelength (nm): 514.0  
 Illuminant: WHITE  
 Incident medium: AIR  
 Substrate: BK7  
 Detector: IDEAL

\* Range of wavelengths (nm): 460.0 to 580.0 by 1.0  
 Incident angle (deg): 0.00

Range of angles (deg): 0.00 to 30.00 by 1.00  
 Incident wavelength (nm): 550.0

## Optimization Parameters:

Method: Gradient  
 Iterations: 100  
 Power: 2  
 Error tolerance: 0.000001  
 Maximum change (%): 10.00  
 Optimize Sensitivity?: No

No variable material data.

## Formula:

$AL (LH)^3$

## Symbol Material Thickness Group Optimize?

H	TiO2_V	1.0000	1	Yes
L	SiO2_2V	1.0000	1	Yes
A	AL	1.0000	1	No

## Group Factor Optimize?

1	1.0000	No
---	--------	----

## Front

Layer	Material	QWOT	Thick (nm)	Group	Optimize?
1	AL	0.5551	100.00	1	No
2	SiO2_2V	1.8449	162.25	1	Yes
3	TiO2_V	0.9979	55.92	1	Yes
4	SiO2_2V	0.9962	87.61	1	Yes
5	TiO2_V	1.0033	56.23	1	Yes
6	SiO2_2V	0.9997	87.92	1	Yes
7	TiO2_V	0.9970	55.87	1	Yes

No back layer data.

Target	Kind	Refl/Tran	Polar.	Wavelength	Angle	Target Value	Tolerance
1	Intensity	Refl	Ave	514.0	0.00	0.00	1.0000

No comments.

## REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD-NL)

1. DEFENSE REPORT NUMBER (MOD-NL) TD960318	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER TPD-HOI-RPT-960060
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 533002	5. CONTRACT NUMBER A93/D/123	6. REPORT DATE 19 augustus 1996
7. NUMBER OF PAGES 38	8. NUMBER OF REFERENCES 4	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final report
10. TITLE AND SUBTITLE Ontwikkeling van de F-PVIS ten behoeve van metingen aan de Mega Ampère Pulser (Development of the F-PVIS for measurements with the Mega Ampère Pulser)		
11. AUTHOR(S) Cheng L.K.		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Institute of Applied Physics Stieltjesweg 1 2628 CK Delft, The Netherlands		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Sponsoring agency: TNO Prins Maurits Laboratory, Lange Kleiweg 137, 2288 GJ Rijswijk, The Netherlands Monitoring agency: TNO Defence Research, Schoemakerstraat 97, 2628 VK Delft, The Netherlands		
14. SUPPLEMENTARY NOTES Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE) This report describes the TPD activities on the Mega Ampère Pulser (MAP) between 1993 and 1995. In this period, a fiber optic Fabry-Perot Velocity Interferometer System (F-PVIS) for measuring the flyer velocity in the MAP is built and tested. Herewith investigations and experiments are carried out on the individual components of the F-PVIS. The main part of the investigation involves the fabrication of a transparent slit with a width of 150 µm in the high-reflection coating of the Fabry-Perot interferometer. From the test results, the measurement range of the F-PVIS is found to be more than 20 km/s and the resolution is better than 100 m/s. Besides of the flyer velocity, PML has also used the F-PVIS for shockwave analysis by measuring the velocity of the boundary between a test material and a PMMA plate. Another application under investigation is the use of a fiber optic sensor probe (in combination with the F-PVIS) for shockwave analysis inside a test material. In the future, the shockwave velocity inside a test material could also be deduced by applying multiple sensor probes.		
16. DESCRIPTORS Interferometers, Fabry-Perot, High speed phenomena, Impacts		
IDENTIFIERS		
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Subject to approval MOD-NL		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

# Distributielijst

1	Bureau TNO-DO	compleet
2	DWOO	compleet
3	HWO-CO	beperkt
4	HWO-KL	beperkt
5	HWO-KM	beperkt
6	HWO-KLu	beperkt
7	TNO-PML t.a.v. ir. J.L.M.J. van Bree	compleet
8 t/m		
10	TNO-PML t.a.v. dr. A.C. van der Steen	compleet
11	TNO-PML t.a.v. ing. W.C. Prinse	compleet
12	TNO-PML t.a.v. dr. R.H.B. Bouwma	compleet
13	TNO-TPD t.a.v. ir. L.K. Cheng	compleet
14	TNO-TPD t.a.v. A.J.A. Bruinsma	compleet
15	TNO-TPD t.a.v. ir. C. Smorenburg	compleet
16 t/m		
18	Bibliotheek KMA	compleet